第 41 卷 第 4 期
2023 年 12 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 41, No. 4
Dec., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.04.03

基于环绕器穿透雷达的火星次表层介电参数反演及其在水冰探测中的应用

杜 维[1,2,3]，苏 彦[1,2,3]，戴 舜[1,2]，张宗煜[1,2,3]，洪天晟[1,2,3]，刘书宁[1,2,3]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京 100012； 2. 中国科学院 月球与深空探测重点实验室，北京 100012；
3. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 火星是太阳系中的类地行星之一，研究火星的演变和现状对进一步了解地球环境的形成和未来演化具有重要意义。对火星表面地形地貌的探测和研究表明，火星表面曾经存在液态水，因此寻找火星上的水冰是进行火星探测的重要科学目标之一。在火星探测中，穿透雷达利用电磁波的穿透特性获得分层界面的回波时延与信号强度来反演次表层物质的介电常数和损耗角正切。次表层的介电特性参数有助于推断该层介质的物理特性以及是否存在水冰等重要信息，进而了解火星的气候和地质演化历史。文章介绍了环绕器雷达的探测原理；然后介绍了利用次表层探测雷达的回波数据来反演火星介质的介电参数的方法，以及这些方法在探测火星水冰中的科学应用和成果；最后对我国的环绕器雷达应用前景做出了展望。

关 键 词： 火星；介电常数；环绕器雷达；次表层；水冰

中图分类号： P185.3　　**文献标识码：** A

1 引 言

火星是太阳系中与地球最相似的行星，探索火星地下结构有助于我们研究火星的撞击历史、地质改造过程及环境演变历史，并进一步认识地球的演变过程。20 世纪 60 年代以来，人类已实施了 40 多项火星探测任务[1]。对火星表面地质情况的探测证明了火星曾经有大量的水流动[2, 3]。1972 年，“水手 9 号”拍摄的图像首次显示了火星上巨型渠道与河谷网的大规模侵蚀特征；随后，“海盗号”于 1975 年拍摄的图像提供了有关这些渠道与山谷的更多细节，这些地形地貌特征都很可能是火星曾经被流水冲刷过后保留下的痕迹。液态水被认为是生命存在的基础和前提条件，一方面，探索火星上液态水是寻找火星生命痕迹的重

收稿日期： 2022-08-22； **修回日期：** 2023-06-30

资助项目： 国家自然科学基金 (12073048, 62227901)

通讯作者： 杜维，duwei1@bao.ac.cn

要手段；另一方面，水深度参与到火星大气循环、气候演变历史和表面塑造过程中[4, 5]。因此，寻找各种形式水的存在是许多火星探测任务的重要科学目标之一。火星的次表层记录着星体形成和演化的重要信息，探测和研究次表层的物理特性及其结构，可以使人们对火星的矿物资源与地质演化历史有更深刻的认识。探地雷达 (ground-penetrating radar, GPR) 是最适合行星探测的地球物理手段之一，因为行星的浅层地壳通常呈干燥或低温状态，这种条件有利于电磁波向地下深处穿透[6]。环绕器穿透雷达由于轨道高度高而具有高覆盖率，可在空中实现对地的大规模探测，成为探测火星次表层结构和各种形式水的一个有效工具。穿透雷达的工作原理是将电磁波发射到行星表面，接收来自行星内部介电特性不连续的分界面产生的反射波和散射波，以及穿透内部介质的透射波。通过分析雷达回波的时延、振幅和频率等特性，结合反演模型，就可以对行星介质进行介电参数反演，从而实现对行星内部结构的探测和成像。雷达探测技术已经广泛应用于月球、火星及其他天体的探测，获得了丰富的科学成果，在深空探测任务中发挥了重要的作用[7−9]。文章首先介绍了国内外的环绕器雷达，然后总结了它们所使用的介电参数反演方法，最后给出这些方法在探测火星液态水及水冰中的科学应用和成果，这对我国火星探测任务中的雷达数据处理有一定的参考意义。

2 环绕器穿透雷达介绍与工作原理

2.1 国内外火星环绕器雷达

目前，正在运行的用于火星次表层探测的火星环绕器雷达共有三个，分别为火星次表层和电离层探测先进雷达 (Mars advanced radar for subsurface and ionosphere sounding, MARSIS)、火星浅表层雷达 (shallow subsurface radar, SHARAD) 及火星环绕器次表层探测雷达 (Mars orbiter subsurface investigation radar, MOSIR)。MARSIS、SHARAD 和 MOSIR 都是合成孔径雷达 (见图 1)，它们使用不同的工作参数和数据处理算法来实现不同的探测深度和分辨率。以下分别对他们进行介绍并对比它们的主要参数。

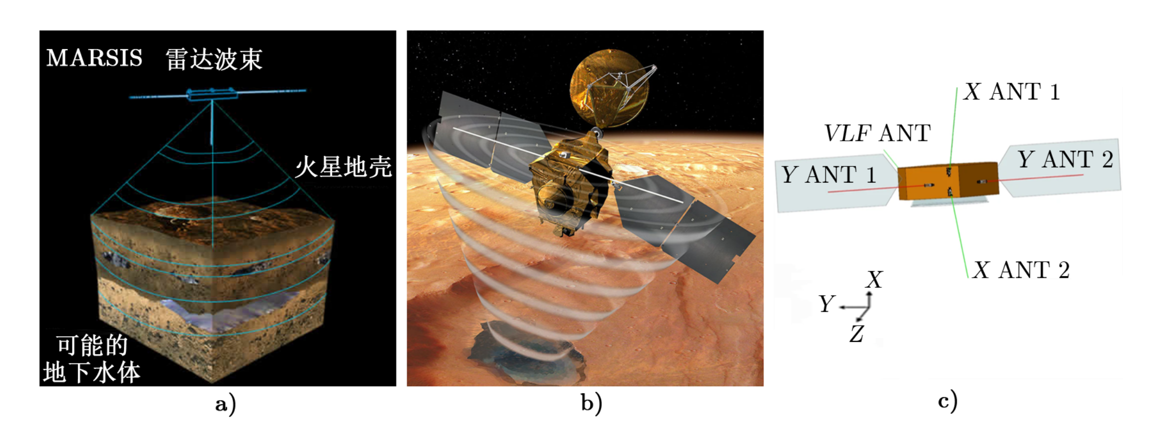


图 1 a)、b)、c) 分别为火星 MARSIS[10]、SHARAD[11] 和 MOSIR[12]雷达的探测示意图

欧洲航天局在 2003 年发射的火星探测器——火星快车 (Mars Express) 搭载的 MARSIS，为火星的电离层及火星次表层的探测提供了大量的数据与研究成果。MARSIS 仪器由 40 m 天线、发射机/接收机系统和数字电子系统组成，是第一台能够探测火星表面之下 (约 5 km) 的仪器。其工作频段为 1.3 ∼ 5.5 MHz，被划分为 4 个子频段，每个频段带宽为 1 MHz，分别为 1.3 ∼ 2.3 MHz、2.5 ∼ 3.5 MHz、3.5 ∼ 4.5 MHz 和 4.5 ∼ 5.5 MHz，真空中垂直分辨率为 150 m，在冰盖中的穿透深度可达 3.7 km。MARSIS 是非聚焦合成孔径雷达，使用多普勒波束锐化 (Doppler beam sharpening, DBS) 算法来提高地下回波与表面回波的比值[13]，最佳水平分辨率可达 2 km。Picardi 等人[14]，Plaut 等人[15]和 Holt 等人[16]介绍了 MARSIS 所探测到的火星的次表层结构以及火星两极区域的水冰特征信息，这些探测结果对国际上开展的火星水冰研究产生了促进作用。

美国航天局在 2005 年发射了火星勘测轨道器 (Mars reconnaissance orbiter, MRO)，搭载了由意大利空间局提供的 SHARAD，它是第二个在火星轨道上运行的环绕器雷达。SHARAD 的工作频段为 15 ∼ 25 MHz，带宽 10 MHz，与 MARSIS 相比，具有更高的距离向分辨率 (在自由空间中可达 15 m)，在冰盖中的穿透深度可达 1.7 km。SHARAD 是聚焦合成孔径雷达，使用线性调频变标 (chirp scaling, CS) 算法对数据进行处理，最佳水平分辨率可达 300 m[17]。由于 SHARAD 具有优越的垂直分辨率，所以它的主要优势在于绘制更精细的地层结构，揭示极地层状沉积物的更多细节，并为我们在火星上许多地方观测到的沉积层结构增加了第三维度的认识。SHARAD 于 2006 年 10 月 3 日开始了它的科学行动：收集来自表层和次表层的雷达数据。它的科学目标主要是：在选定的地点绘制出火星地下至少几百米深度的次表层分界面，搜索有关地下冰层、岩石，或许还有融水的信息。根据现有的探测数据与结果，SHARAD 展示了其能够探测数千米富含冰的极地沉积物的能力[18]。

中国于 2020 年发射了天问一号 (TianWen-1) 探测器，探测器包括轨道器和巡视器，均搭载了次表层穿透雷达，将开展环绕和巡视相结合的全方位探测，环绕器上搭载了 MOSIR[19]。考虑到穿透深度与距离分辨率之间的最佳权衡，MOSIR 有低频和高频工作模式，频带分别为 10 ∼ 15 MHz、15 ∼ 20 MHz 与 30 ∼ 50 MHz，5 MHz 和 20 MHz 的带宽分别可以实现 7.5 m 和 30 m 的自由空间垂直分辨率，在冰盖中的穿透深度大于 1 km。MOSIR 是聚焦合成孔径雷达，目前在数据处理中初步使用后向投影 (back project, BP) 算法实现星上实时聚焦成像[20]，水平分辨率可达到百米级别。MOSIR 的科学目标是：1) 观测航天器进入火星轨道过程中低频无线电波的强度；2) 利用交叉极化雷达回波对火星表面和地下结构进行雷达探测；3) 测量火星表面地形；4) 测量火星电离层的总电子含量。

作为目前已有不少探测结果的两台火星环绕器搭载的用于探测火星次表层的雷达，MARSIS 与 SHARAD 的探测数据常常被结合起来进行分析。Fois 等人[17]对比了 MARSIS 与 SHARAD 对同一区域进行探测得到的雷达图像。可以明显看出，MARSIS 探测到的信号来自 3 km 深度的地下界面，而 SHARAD 在相同区域、相同深度接收到的信号比背景噪声弱很多。不过，SHARAD 的雷达图能够显示出 100 ∼ 200 m 深度的分层结构；MARSIS 由于垂直分辨率比 SHARAD 低，无法识别出这一现象。综上所述，MARSIS 与 SHARAD 的探测信息相互补充，MARSIS 能够探测到更深的地下结构，SHARAD 数据则可以为

MARSIS 数据增加火星地壳上部更精细的地质信息。

寻找水冰是三台环绕器雷达对火星进行探索的主要科学目标。MARSIS 与 SHARAD 在运行至今十几年的时间里，获得了许多科学数据，探测区域的覆盖范围十分广阔。与前两者相比，MOSIR 具有双频和双极化的独特优势。一方面，它具有双频工作频率，10 ～ 20 MHz 的低频段位于 MARSIS 与 SHARAD 的频率之间，30 ～ 50 MHz 的高频段高于 MARSIS 和 SHARAD。特别对于存在争议的地方，例如 MARSIS 探测到的液态水，SHARAD 由于穿透能力小而导致无法穿透到已发现液态水的火星南极层状沉积物 (south polar layered deposit, SPLD) 底部对其进行探测和确认，对此，具有不同穿透深度和分辨率的双频 MOSIR 将能够做出有力的补充和验证。另一方面，在地球上针对水冰的研究表明，雷达回波会受到水冰极化特性的影响，可用作探测水冰[21–23]，因此，MOSIR 采用双极化探测可以获取探测区域的极化特性，将在火星水冰探测中发挥重要的作用。根据 Liu 等人[24]对 MARSIS 不同频率下的次表层探测结果的对比分析，1 ～ 5 MHz 的低频电磁波具有良好的穿透深度。然而这种低频率和窄带宽的探测方式分辨率较低，可能导致反演结果不准确。因此，5 MHz 甚至更低的频率可能更适合用于电离层探测，而不是地下探测。而高于 50 MHz 的较高频率穿透深度非常浅 (100 m 甚至更小，这取决于介质的介电特性)，导致探测范围有限。综合考虑，我国的环绕器雷达探测应用 15 ～ 20 MHz 的中心频率，还可以在实现高分辨率的同时保证探测的深度，并便于与 SHARAD 数据进行比较。由此可见，MOSIR 特有的双频/双极化探测能力能够弥补国外雷达不同探测深度、不同分辨率和极化特性缺失的空白，这些数据将会是现有数据的补充。并且在 MARSIS 和 SHARAD 的数据处理技术、参数反演理论较为成熟的基础上，很多相关研究方法可以直接应用于 MOSIR，进一步为火星气候变迁和演化历史提供科学依据。表 1 对比了 MARSIS、SHARAD 和 MOSIR 的主要参数。

表 1 各火星环绕器雷达主要参数对比

	MARSIS[25]	SHARAD[25]	MOSIR[12]
任务名称	Mars Express	Mars Reconnaissance Obiter	Tianwen-1
发射年份	2005	2006	2020
天线长度/m	40	10	10 (X 方向) 10 (Y 方向)
工作频段/MHz	1.3 ～ 5.5	15 ～ 25	10 ～ 20/30 ～ 50
带宽/MHz	1	10	5 (低频)/20 (高频)
穿透深度/km	0.5 ～ 5	0.1 ～ 1	大于 0.1 (火星土壤) 大于 1 (水冰)
距离分辨率 (真空) /m	150	15	30 (5 MHz 带宽) 7.5 (20 MHz 带宽)
水平分辨率 (顺轨) /km	5 ～ 9	0.3 ～ 1	0.75 ～ 1.9/0.5 ～ 0.87
水平分辨率 (交轨) /km	15 ～ 30	3 ～ 7	10 ～ 21/5 ～ 9

2.2　环绕器穿透雷达工作原理

对火星的结构与性质进行探测的方法中，利用雷达能够更好地获得有关火星地层结构、反射率、表面形貌、介电常数等物理信息。雷达探测器发射一定频率的电磁波穿透火星表面，分析其在介质中的反射回波来获得地下介质的信息，这种方法其实是利用介质的物理性质差异来进行探测。

如图 2 所示的两层模型下的星载表面穿透雷达探测原理，假设火星表层介质的介电常数为 ε_1，次表层介质的介电常数为 ε_2，环绕器雷达发射的电磁波穿过火星的大气层到达火星表面，随后天线接收到的第一个回波来自距离最短的星下点 A，时间延迟是 $2H/c$，接着入射电磁波的一部分继续向下传播至火星的次表层，其中伴随着能量的衰减，衰减程度取决于电磁波波长与介质的电磁特性等，然后在介电常数不同的次表层分界面发生反射，产生天线接收到的下一个回波。一般来说，探测频率越高，波长越短，穿透性能较差，但是距离分辨率高，可以获得较为精细的浅表层结构；频率越低，波长越长，可以穿透较深的深度，但是距离分辨率低，适合探测深层结构。在电磁波从天线发射到抵达火星表面的过程中，电磁波的幅度和相位会因为受到电离层的影响而产生畸变，因此在后续处理雷达回波信号时，需要进行电离层校正[13, 26]。并且，为了确定回波来自地下分界面，而不是来自粗糙地面引起的表面杂波，通常需要进行杂波仿真，提取出有用的地下回波[27–29]。

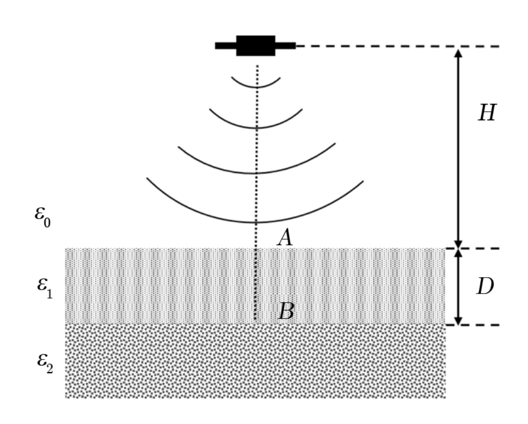


图 2　星载表面穿透雷达探测原理示意图

3　火星介电参数反演方法

火星表面物质的介电特性是表征电磁能在火星土壤中散射和传输的重要参数。理解传播的电磁能量与地下物质材料的相互作用机理的关键在于：雷达图像显示的并非地下探测区域本身的截面形状，而是接收天线记录的地下物质材料对电磁波的时变响应，我们需要探究材料的宏观效应是如何影响雷达信号的衰减和传播速度，从而从数据中提取有意义的目

标属性信息。复介电常数 ε^* 是常用来衡量火星介质特性的参数：

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 \left(\varepsilon' - j\varepsilon'' \right) \quad , \tag{1}$$

式中，ε_0 为自由空间的介电常数，ε_0=0.885 4 F/m，ε_r 为介质的复相对介电常数，表示为：

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad . \tag{2}$$

ε' 是复介电常数的实部，常简称介电常数，是综合反映介质极化行为的一个主要的宏观物理量，反映了物质储存电磁能的能力；ε'' 是复介电常数的虚部，与电导率有关，即：

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad , \tag{3}$$

式中，σ 为电导率，ω 为电磁波的角频率。几乎所有非金属矿物的介电常数 ε' 在 $4 \sim 13$ 之间，金属矿物多为 $17 \sim 74$ 或者更高，因此，对于火星物质来说，其矿物组成、结构以及测试频率等，都是决定其复介电常数的主要因素。

δ 为介质材料的电损耗角，$\tan\delta$ 为损耗角正切，该值反映的是介质的电磁波在介质中的能量损耗：

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad . \tag{4}$$

介电常数和损耗角正切是用来研究火壤的重要介电参数，它们决定了给定频率的电磁波在次表层的穿透深度及衰减。我们可以据此获得许多科学信息，例如绘制更准确的地下结构剖面图、推测地表下的物质成分与来源，以及进行水冰的探索，估计水冰含尘量等。

3.1 介电常数反演方法

通过分析雷达回波来获取产生反射信号的次表层物质的介电特性，从而框定甚至确定其组成成分及结构，本质上是一个信号的反演问题，多年来已有许多反演方法被提出[30–32]。因此，测量或计算出雷达回波因为受到了地下介质的影响而改变的参数，例如，测量回波时延、回波功率等，就能获得电磁波的传播速度、电磁波的衰减等信息，反演出介质的介电参数，为下一步研究火星的地质地形、演化过程等科学问题提供依据。其中，时延和强度是我们能从雷达回波中获取到的两个重要参数，使用最多的方法是利用表层与次表层回波的时延差值，根据电磁波在介质中的传播特性进行反演，以及分析两者的回波功率强度，将其作为观测值来求解次表层的物理参数。下面介绍这两种方法及其应用。

3.1.1 时间延迟反演法

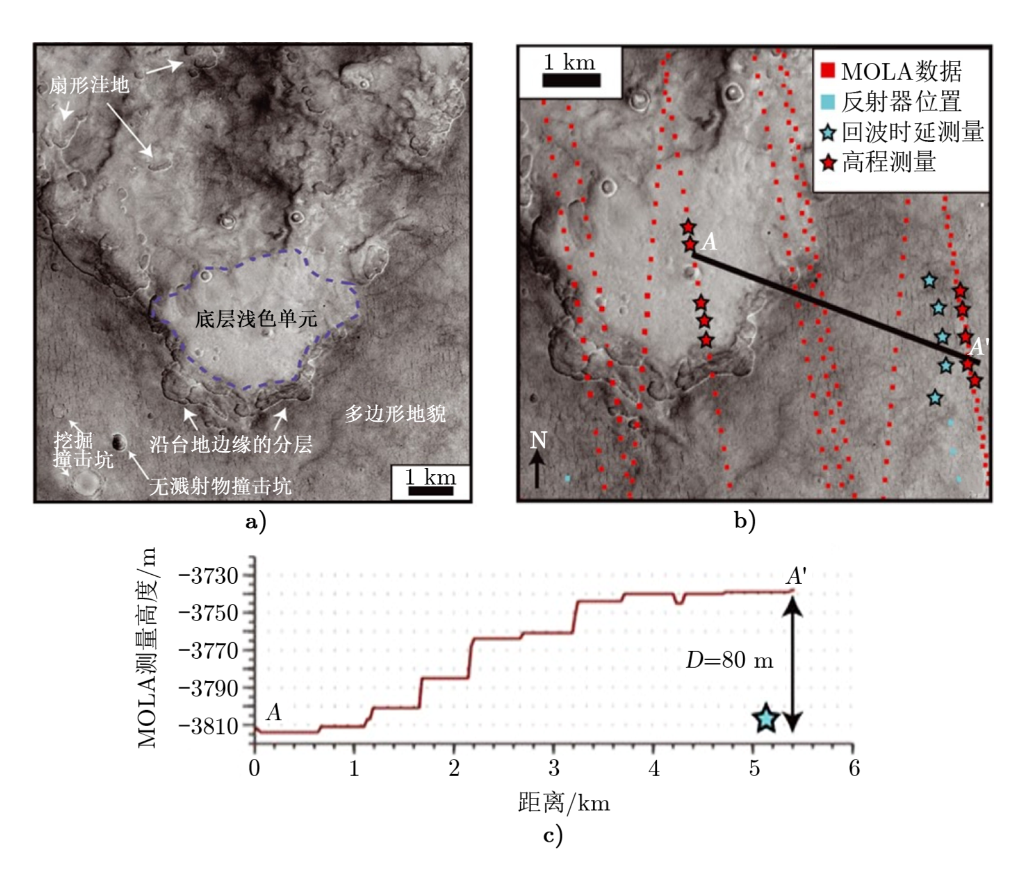
根据电磁波在介质中的传播性质，表层与次表层之间的传播时延差 τ 为：

$$\tau = \frac{2D\sqrt{\varepsilon_1}}{c} \quad , \tag{5}$$

式中，c 为真空中的光速，D 为表层与次表层之间的厚度，ε_1 为层间介质的介电常数。利用所测的回波时延 τ，可以在测得层间介质厚度 D 的条件下，估算介质的介电常数值 ε_1，或是在预设层间介质介电常数为 ε_1 的情况下，估算层间介质的厚度 D。

Stuurman 等人[33]利用 SHARAD 数据，结合 MOLA 数据计算了火星乌托邦平原地区的介电常数。作者首先结合 MOLA 测得的火星表面数字高程模型进行杂波仿真，确定了表面地形未引起与地下回波混淆的杂波；然后，作者对轨道数据进行分析，得到表层与次表层回波的时间延迟 τ，同时也用 MOLA 高程数据与地质约束条件估算了对应于覆盖在反射界面上的材料厚度 D，即次表层反射界面的深度；最后，依据电磁波在介质中的传播特性 (见式 (5))，利用时延 τ 和层厚 D 进行线性回归计算介电常数 ε_1，回归得到的介电常数值为 2.8 ± 0.8，符合一个多孔隙水冰混合物材料的介电特性。值得注意的是，上述利用 MOLA 数据获得层间厚度 D 来反演介电常数 ε_1 的方法只适用于具有裸露地层 (明显的覆盖层) 的区域 (如图 3 所示)。因为在这种情况下才可以明显分辨出次表层位置，并直接从 MOLA 高程数据中得到对应表层和次表层的高度，从而获取两者的高度差，即层厚 D。

假设媒质中的传播速度已知，则可将接收回波的时延转换为深度，因此，该方法在估算层间介质厚度[14, 15, 34]中的应用也十分广泛。该方法比较简单直观，但对研究区域的地形有一定的要求。



注：a) 层状台地单元；b) 厚度测量示意图；c) 由 MOLA 数据得到的台地高度。

图 3　乌托邦平原西部典型的分层台地及使用 MOLA 进行层厚度测量的示意图[33]

3.1.2 回波功率反演法

地表回波与地下回波之间的时间延迟是重建地下地层的主要信息，不过回波本身也包含了界面反射功率的信息，这与界面的反射率有关，而反射率主要受到物质的介电性质及界面粗糙度的影响。

在实际研究中，常用表面介电常数来替代表层介质的介电常数，反演表面介电常数需要建立在回波仿真的基础上。如上文所述，表面回波功率与入射波功率和表面反射率相关，而表面反射率受到表面介电常数和粗糙度的影响。对于垂直入射的电磁波，可以使用一个简化的雷达方程，应用斯涅尔定律来估计表面回波的强度。假设环绕器雷达高度为 R，表面回波峰值功率可表示为[35]：

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{4(4\pi R)^2} r_{0,1} \quad , \tag{6}$$

其中，P_t、G、λ 和 $r_{0,1}$ 分别是雷达发射功率、天线增益、发射波波长和表面反射率。Grima 等人[36]使用 SHARAD 数据，将表面回波功率 P_r 分解为相干分量 P_c 和非相干分量 P_n：$P_r = P_c + P_n$，并给出火星表面回波功率 P_r 与粗糙度系数 χ^2、后向散射系数 σ^0 的关系：

$$P_c = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 (2R)^2} {\mathit{\Gamma}_s}^2 \chi^2 \quad , \tag{7}$$

$$P_n = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \iint_{A_0} G^2 \sigma^0 \mathrm{d}s \quad , \tag{8}$$

其中，$\mathit{\Gamma}_s$ 是菲涅耳反射率项，A_0 是表面回波振幅，两个信号分量都包含了粗糙度参数，说明火星表面粗糙度会对表面回波功率产生影响。为了解决该问题，Mouginot 等人[35]使用了小面元法[37]对火星表面进行建模并通过回波仿真校正了粗糙度对信号的影响，于是就可以通过表面回波功率对表面介电常数进行反演。表面反射率 $r_{0,1}$ 可表示为：

$$r_{0,1} = \mathit{\Gamma}_s(\varepsilon) f_s(rms_s, \lambda) \quad , \tag{9}$$

其中，f_s 是由表面地形结构产生的后向散射。通过将真实回波功率除以模拟回波功率，我们可以得到：

$$\frac{P_{\text{simu}}}{P_{\text{real}}} = \frac{r_{0,1\text{simu}}}{r_{0,1\text{real}}} = \frac{\mathit{\Gamma}_s(\varepsilon_{\text{simu}})}{\mathit{\Gamma}_s(\varepsilon_{\text{real}})} \quad , \tag{10}$$

其中，$\varepsilon_{\text{simu}}$ 和 P_{simu} 分别表示预设的介电常数值与其回波功率的仿真值，$\varepsilon_{\text{real}}$ 和 P_{real} 分别表示真实介电常数值和接收到的回波功率值。对于表面界面，菲涅尔反射系数 $\mathit{\Gamma}_s$ 为：

$$\mathit{\Gamma} = \frac{n_i - n_j}{n_i + n_j} \quad , \tag{11}$$

其中，n_i 和 n_j 分别表示界面两端介质的折射率，对于表面界面，两端介质分别为真空和浅表层物质，n_i 取 1。将介电常数 ε 与折射率 n 的关系 $(n = \sqrt{\varepsilon})$ 代入式 (11)，再结合 (10)，表面回波功率的仿真结果 P_{simu} 与真实结果 P_{real} 的比值可以近似为：

$$\frac{P_{\text{simu}}}{P_{\text{real}}} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_{\text{simu}}}}{1 + \sqrt{\varepsilon_{\text{simu}}}} \cdot \frac{1 + \sqrt{\varepsilon_{\text{real}}}}{1 - \sqrt{\varepsilon_{\text{real}}}} \quad . \tag{12}$$

两者的差异则代表了介电常数的预设值与真实值的偏差。

在此框架下，基于回波功率反演介电常数是许多学者关注的热点，并且已经取得了较多研究成果。在 Mouginot 等人[35]只计算表面介电常数值的基础上，许多研究将火星的地下结构建立为如图 2 所示的两层介质模型。例如，Liu 等人[24]建立了粗糙表面的两层地质模型，并基于数值模拟方法和惠更斯原理，分别推导了表层、次表层介电常数和风化层厚度的反演方法。但此方法对火星的陡坡或陨石坑边缘进行了平均斜率为 0 的粗糙表面近似，所以需要选择特定的地形相对平缓的反演区域才能适用。Orosei 等人[38]根据探测到的异常高的次表层回波强度来识别南极冰盖下液态水的存在。其中需要假设和建立火星表层介质的电磁特性，获得表层与次表层的回波功率比与表层介质的介电常数值之间的关系，并以此判别次表层介质的类型。文中使用火星表面一些已知物质的介电参数值作为反演的先验信息 (见表 2)。对于具有明显层状地形的区域，还可以结合时延法和回波功率法来获得第一层介质与第二层介质的介电常数[39]，其中，第二层介质的介电常数是通过分析表面信号有无经过第一层介质的功率差得到的。

表 2　火星地质材料的介电参数[38]

地质材料	介电常数 ε'	损耗角正切 $\tan\delta$
火成岩[40, 41]	$4\sim 9$	$10^{-3}\sim 10^{-2}$
水冰 (H_2O ice)[42]	3.1	$10^{-7}\sim 10^{-1}$
干冰 (CO_2 ice)[43]	2.2	4×10^{-3}
液态水[41]	≈ 80	$\approx 10^{-3}$
卤水[41]	$80\sim 100$	$10\sim 100$

除了以上基于两层地质模型的介电常数反演之外，还有根据火星不同区域的地质特性所建立的多层反演模型及方法。如 Meng 等人[44]发现 Elysium-Utopia 地区的同一块区域，MARSIS 与 SHARAD 对其反演得到的介电常数值不一样，因此作者对此进行分析后建立了三层介质模型来研究这块区域。目前多层介质的介电常数反演方法主要应用于研究火星极区的层状沉积，并且假设每个分层是光滑的，图 4 给出多层水平介质模型，此时，第 n 层介质的上表面回波功率 P_n 近似表示为[45]：

$$P_n = P_0 r_n \prod_{m=1}^{n-1} [(1-r_m)^2 \exp(-k_0 c \tau_m \tan\delta_m)] \quad , \tag{13}$$

其中，P_0 是表面入射波功率，k_0 是自由空间的波数，r 是反射率。每一层介质的损耗角正切和表层介电常数实部可以由上文介绍的方法得到，而其余任意一层介质的介电常数实部 ε_n' 可以由它上层介质的介电常数实部 ε_{n-1}' 得到。Lalich 等人[46, 47]利用多层反射模型，对极区层状沉积物的分层尘埃分数进行了反演，但具有无法约束分层的厚度和尘埃分数的缺点。可以看出，虽然相较于时延法，回波功率法的使用范围更广，不必寻找特殊地形，但其具有依赖对地质特性预设的缺点。

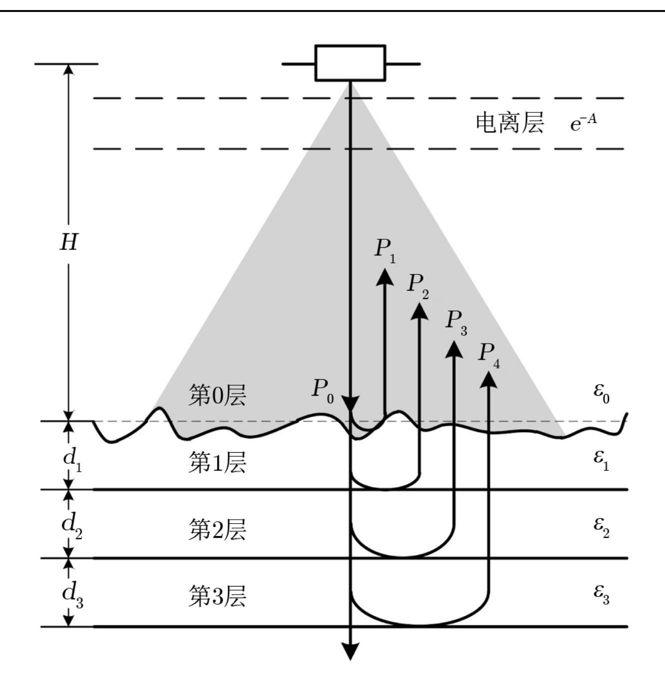


图 4 多层水平介质模型[45]

3.2 损耗角正切反演方法

表层介质的损耗角正切反演基于这样一个假设：介质的上表面及下表面的反射率处处相同。在这个假设下，根据 Orosei 等人[38]定义的表层回波功率与次表层回波功率：

$$P_s = P_t \times \left(\frac{G\lambda}{8\pi H}\right)^2 \times R_s \quad , \tag{14}$$

$$P_{ss} = P_t \times \left(\frac{G\lambda}{8\pi(H+z)}\right)^2 \times (T_s)^2 \times R_{ss} \times \exp(-2\pi f \tan\delta\tau) \quad , \tag{15}$$

其中，z 是介质厚度，$T_{\rm s}$ 是表面透射系数，f 是雷达频率，$R_{\rm s}$ 和 $R_{\rm ss}$ 分别表示表层和次表层的菲涅耳反射系数，$\tan\delta$ 是表层与次表层之间介质的损耗角正切。$\left(\frac{G\lambda}{8\pi H}\right)^2$ 项表示电磁波传播过程中造成的几何损失，$\exp(-2\pi f\tan\delta\tau)$ 项表示雷达信号在地下传播时因介质损耗而产生的衰减。由式 (14) 和式 (15) 可以得到：

$$\ln P_{\rm ss}(\tau) = -2\pi f \tan\delta\tau + \left(\ln P_{\rm s} + \ln\left(\frac{R_{\rm ss}}{R_{\rm s}} T_{\rm s}^2\right)\right) \quad . \tag{16}$$

可以发现，$\tan\delta$ 与 $\ln P_{\rm ss}(\tau)$ 具有一定的线性关系，我们可以拟合回波时延与次表层回波强度的关系，拟合曲线的斜率即可用来表示介质的损耗角正切。

综上所述，利用雷达数据进行火星物质的介电参数反演理论基础较为成熟，实际应用中方法大同小异，但都受限于先验知识的缺乏，如层间厚度、地下物质组成等。因此，如何更准确地获得这些先验值是一个重要的研究内容，目的是得到更符合实际情况的反演结果。

4　火星水冰探测现状

了解水在火星演化中的作用对于了解火星的气候、地质历史和潜在的宜居性至关重要。火星的两极地区覆盖着大量精细分层的沉积物，这些沉积物记录着一段未知时间跨度的气候变化，最初是在“水手号”和“海盗号”太空船获得的轨道图像中被识别出来，发现火星表面拥有纵横交错的河床、峡谷、河道等地貌，因此，许多学者认为这是液态水存在过的证明，火星探测数据也进一步证实了两极有大量的水冰[48]。如今，火星上的大部分冰都位于极地地区，那里覆盖着绵延数百万平方公里、厚度达数千米的冰原，这些沉积物由一些成因、成分和时代不同的地质单元组成，记录了可能有 $10^5 \sim 10^9$ a 的时间尺度上的火星气候变化[49]。火星轨道倾角的变化影响着水冰的分布，赤道等低纬度地区均有探测到水冰的存在[50−52]。根据 MOLA 获得的地形数据显示，火星北极层状沉积物 (north polar layered deposit, NPLD) 与 SPLD 在总体形态和厚度上相似[53]。NPLD 和 SPLD 地质单元都大致呈圆形，直径约为 1 000 km，相对于周围地形的最大起伏约为 3.5 km。利用 MOLA 数据来估算两极层状沉积的总体积，可以得到一个结果，它们相当于一个分布在全球的 $16 \sim 22$ m 厚的地质层。从轨道图像中可以看出 PLD 由不同反射率的地质层组成，而层间反射率的不一致被认为是由不同的冰尘混合物所造成。冰和尘埃的混合比例不能直接从光学数据中精确测量，但它表明，只需一小部分 ($\leqslant 10\%$) 尘埃，就可以将纯冰的反射率降低到可观测水平[54]。现有的大多数对火星极区沉积层的研究方法为雷达探测方法，与地球上常用的对冰原和冰川内部进行研究的方法一样，MARSIS 和 SHARAD 两台星载雷达已经对探索火星地下水冰、液态水进行了大面积的科学探测，研究人员对它们获得的数据进行了全面细致的分析和研究，得到了一系列的科学成果。文章分别展示了火星两极地区与火星非极地地区的一些可能存在水冰的区域。

4.1　火星北极区域水冰探测

火星北极高原 (planum boreum, PB) 主要由北极残留冰盖 (northern residual ice cap, NRIC)、水冰和灰尘组成的北极层状沉积和基底单元 (basal unit, BU) 组成。MARSIS 和 SHARAD 对北极高原的探测结果揭示了其是存在次表层与基底层的地质结构，并且探测到北极层状沉积层存在冰冻沉积物。通过进一步的研究分析，北极层状沉积物的水冰含尘量、介电常数、厚度分布等信息能够被估算出来。Selvans 等人[34]用 MARSIS 数据对火星北极富含冰的北极高原内部进行了反演，对于探测到的明亮次表层反射位置使用时间延迟法，假设介电常数值为 3，将它们的时间延迟对应转换为厚度，估算出北极高原的水冰体积为 $(1.3 \pm 0.2) \times 10^6\,\mathrm{km}^3$，其两个组成单元，北极层状沉积与基地单元的水冰含量也被更为精细地给出，分别为 $(7.8 \pm 1.2) \times 10^5\,\mathrm{km}^3$ 与 $(4.5 \pm 1.0) \times 10^5\,\mathrm{km}^3$。

Picardi 等人[14]绘制出 MARSIS 沿星下点轨迹的雷达图像，当 MARSIS 的地面轨迹从北部平原进入北极层状沉积的区域时，反射回波分裂成了两条强度相当的反射信号 (见图 5)，信号到第二条反射信号的最大时间延迟为 21 μs。首先通过杂波仿真判断第二条反射信号是由次表层引起的，随后作者假设上层物质为纯冰，使用纯冰的介电常数 (约为 3) 用时间

延迟法将次表层时延转换为深度，估计其为 1.8 km 厚的水冰。从图中可以看出次表层的回波强度几乎与表层回波一样强，说明电磁波在两个界面之间的介质中的传播损耗非常低，增加了这层介质可能是纯水冰的可能性。在 5 MHz 下测量得两层的反射功率约 −10 dB，这一比率表明这层介质的损耗正切值很低，综合其低损耗和低导电性，表明它是杂质含量不可能超过 2% 的纯水冰物质。这一观测结果与 NPLD 底部存在的熔体区不一致。根据仪器设计上的不同，SHARAD 较 MARSIS 能够探测到地下分辨率更高、更精细的结构。Phillips 等人[18]用 SHARAD 数据分析了其探测到的 NPLD 内部分层结构。雷达图像 (见图 6) 较清晰地显示了沉积物内部横向连续的层状沉积产生的反射，从图中可以看出它由 4 组反射层组成，4 组反射层之间的间隔物是均匀接近纯冰的物质，此外，还能探测到该处层状沉积的基底层。同时，探测到北极高原边缘地区的基底层外露，证实格明娜舌状高原下不存在基底层，位于此处的 NPLD 直接覆盖在北方荒原构造 (vastitas borealis formation, VBF) 上。

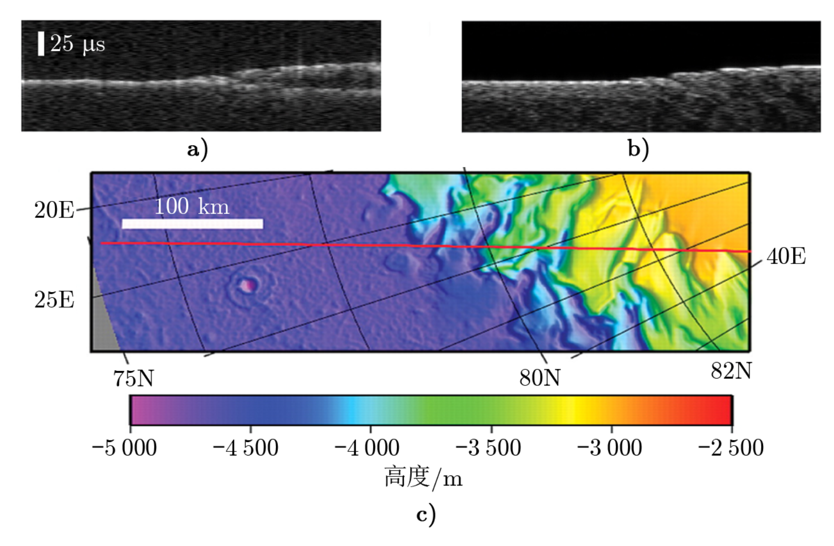


图 5 a) MARSIS 第 1 855 轨显示了 NPLD 边缘的雷达图像；b) 根据该处地形模拟的表面回波雷达图像 (星下点与非星下点)；c) MOLA 测得的沿轨 (红线) 地形[14]

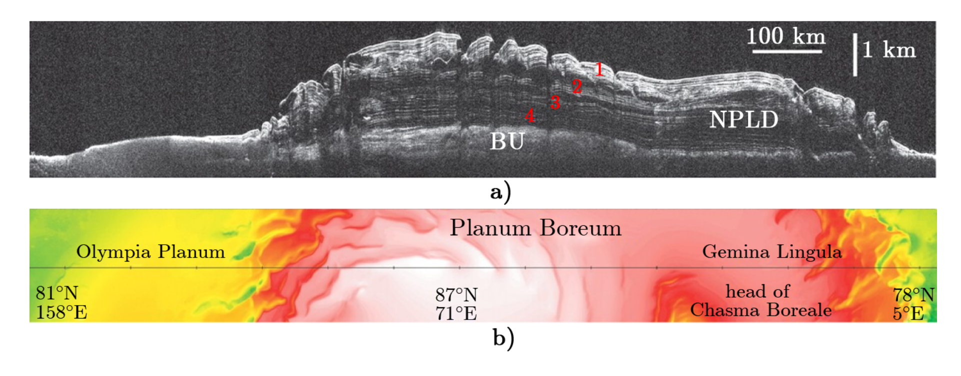


图 6 a) SHARAD 第 5 192 轨获取的 NPLD 图像；b) MOLA 测得的该区域的数字高程图像[18]

通过分析岩石圈在北极盖所施加的应力作用下地球动力学响应，我们可以约束极盖的物质组成及火星如今的热力状况。Selvans 等人[34]与 Phillips 等人[18]分别使用了 MARSIS 和 SHARAD 数据，假设 NPLD 的介电常数实部为 3 的情况下对北极高原进行了反演和分析，发现其底下的岩石圈没有出现明显的挠曲，表明在基底单元出现之前火星北极就存在一个较厚的弹性岩石圈。但是，NPLD 的物质组成和体积很大程度上决定了挠曲是否存在，换句话说，对 NPLD 介电常数的预先假设值决定了对岩石圈挠曲程度的反演结果。Broquet 等人[55]使用雷达数据与挠曲载荷模型结合时间延迟法，估算出北极盖的介电常数实部为 $2.75(+0.40, -0.35)$，解出的极盖体积将会比现有的预测高出 30%，并且极盖中心下的岩石圈挠曲最高可达 400 m，当沉积物中含尘量高于 6% 体积时，组成成分中将有 10% 体积的干冰。Broquet 等人[56]用类似的方法对南极盖的物质组成和岩石圈挠曲程度进行了分析，估算出 SPLD 的介电常数为 $2.5 \sim 3.4$，推测若干冰含量可以忽略不计，含尘量至少为 9% 体积，并且岩石圈挠曲可达 700 m。

4.2　火星南极区域水冰探测

火星南极高原与北极高原相似，也主要由 3 个地质单元组成：南极残留冰盖、南极层状沉积和阿詹泰山脊构造 (dorsa argentea formation, DAF) 组成。Plaut 等人[15]给出了 MARSIS 对 SPLD 的一个探测结果，该研究可以清楚地看出 SPLD 的内部分层结构，以及通过次表层的强反射可以推测出层间介质为对电磁波产生低损耗的水冰。如图 7 所示，当探测器飞过层状沉积物的边缘 (对应图 7 a) 中的左边白色箭头) 时，回波轨迹由一条分裂为上下两条，且强度相当，而上层表面轨迹的轮廓符合 MOLA 对该区域地形的绘制结果。

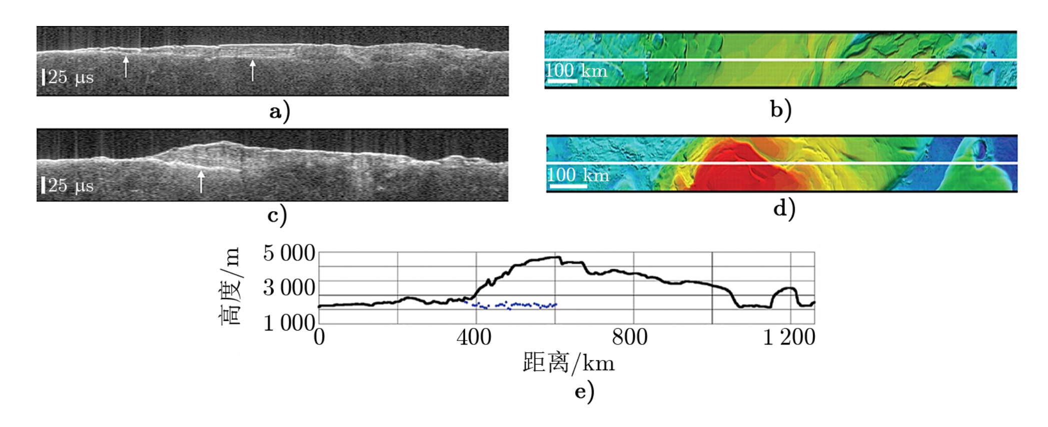


图 7　a) MARSIS 第 2 753 轨的数据，显示了 SPLD 的显著特征；b) MOLA 测得的第 2 753 轨星下点轨迹周围的地形图；c) MARSIS 第 2 682 轨的数据，箭头处为基底强反射体；d) MOLA 测得的第 2 682 轨星下点轨迹周围的地形图；e) 对第 2 686 轨数据，黑色实线为MOLA 所测的地形表面轮廓，蓝色虚线为 MARSIS 所测的基底形状[15]

在假定上层介质为水冰的前提下，使用水冰的介电常数代入公式 (5)，就能够算出明亮的较低轨迹出现的时间延迟对应的深度。这是 SPLD 周边表面地形的延伸，即该区域的地质结构为：以岩屑为主要成分的基底上覆盖着一层富含冰的 SPLD 材料，MARSIS 探测

到的分裂出的下界面则为它们的分界面。若假设该 SPLD 材料是覆盖在玄武岩基体上的脏水冰，则其损耗角正切在 0.001 ~ 0.005 之间，相当于含尘量在 0 ~ 10% 的水冰材料。此外，Plaut 等人[15]还通过从高分辨率的 MOLA 表面地形中减去插值的基底地形的高程数据，生成了整块 SPLD 区域的厚度图，并估算了它的体积：约为 $(1.6 \pm 0.2) \times 10^6\ \mathrm{km}^3$。假设 SPLD 的组成接近纯水冰，则相当于$(11 \pm 1.4)$ m 厚的水覆盖整个火星，这与之前 Smith 等人[53]只利用 MOLA 数据所估算的结果相似。

经过 MARSIS 对 SPLD 全面且详细的探测，Plaut 等人[15]由积累的探测数据做的另一项重要工作是，运用 MOLA 测得的整个 SPLD 的表面高程数据减去经过插值后的 MARSIS 测得的基底高程数据，得到了对应位置的 SPLD 的厚度和范围分布 (见图 8)。

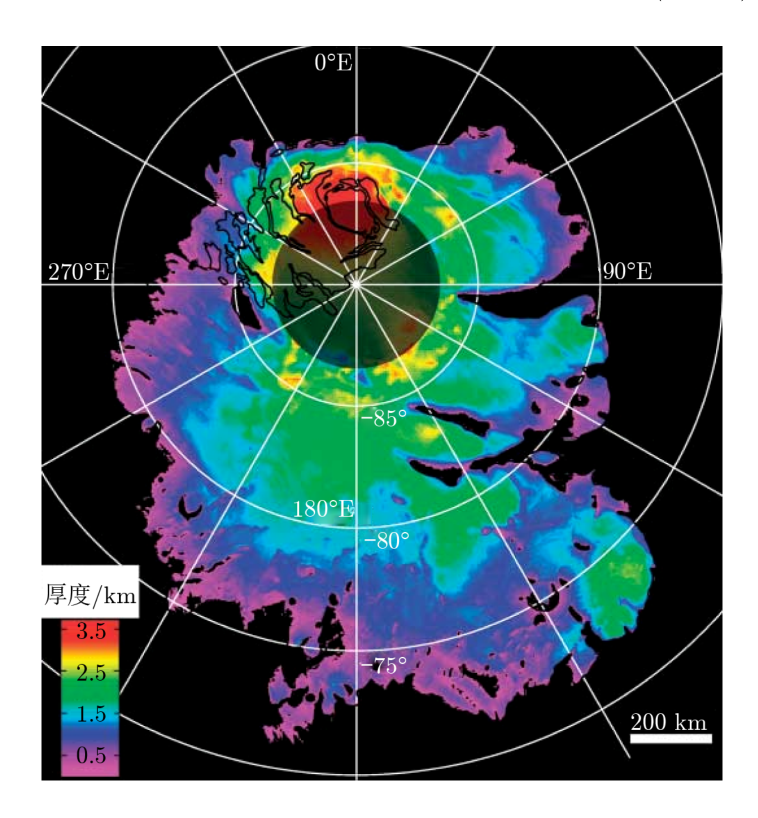


图 8 基于 MARSIS 数据与 MOLA 地形数据绘制的 SPLD 厚度分布图[15]

Khuller 和 Plaut[57]用 MARSIS 从 2005 年以来采集到的火星南极数据，生成了 3D 雷达影像集。如图 9 所示，图中假设次表层为纯水冰，介电常数实部值为 3.1，将垂直方向上的回波时延转换为了深度。重新估算了 SPLD 的体积后得出了与 Plaut 等人[15]一致的结果：约 $1.6 \times 10^6\ \mathrm{km}^3$。

火星极地地区覆盖的富冰层状沉积物蕴含着火星的气候变化历史。Seu 等人[58]利用 SHARAD 获取的探测数据对位于火星南极高原的普罗米修斯舌状地进行研究，分辨出 NPLD 可能由几组米级的次表层分界面组成，假设用水冰的介电常数实部值 3.5，将雷达回

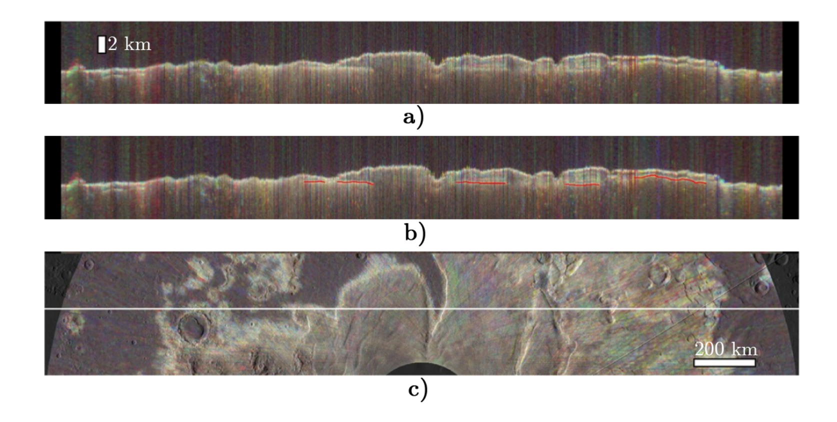


图 9　a) 使用 MARSIS 数据生成的 3D 雷达影像集的垂直切片；b) 与顶部图像相同，用红线标注了基底界面的反射；c) 加入了 MOLA 山体阴影的火星南极图像水平切片，白线对应顶部图像所在的位置[57]

波时延转换为深度后，各分层界面深度分别为 130 ～ 420 m、340 ～ 450 m、450 ～ 570 m、890 ～ 1 030 m。Milkovich 等人[59]同样探讨了普罗米修斯舌状地的地层结构。通过分析和对比 MARSIS 和 SHARAD 的探测结果，发现此处地层数较多，且不是水平的，而是朝向沉积中心较高，朝向沉积边缘较低。地层形状与地形不完全一致，在某些位置与地表存在交会，这表明在 SPLD 的演化历史上，普罗米修斯舌状地地区曾经发生了多次显著的侵蚀作用。Farrell 等人[60]使用 MARSIS 的观测数据对该区域进行深入研究，发现 SPLD 内部的大尺度 (约 100 m) 层状结构。普罗米修斯盆地的地表向 SPLD 平滑延伸至其下方，形成了 SPLD 底部的基底界面，并且普罗米修斯盆地底部 500 m 左右的地下界面，可能是富冰层与基底层的分界面，也就是说，该地区地下 500 m 处可能存在富冰层。

水的存在对于研究天体生物学具有十分重要的意义，评估目前火星上的液态水含量和状态已经成为其探索的驱动力之一。由于火星的温度和气压很低，液态水非常罕见，仅在火星表面短暂存在。然而，有足够的地质学和矿物学证据表明，火星表面曾经有流动的液态水[61, 62]。因此，至少在其部分历史时期，火星的气候与现在有巨大的差异。对于火星南极冰盖底部是否存在液态水，许多学者持不一样的观点。从地质学的角度分析，火星表面最近一次 (不到几百万年) 出现液态水的证据首次由 Malin 和 Edgett[63]报道。通过轨道雷达探测，Orosei 等人[64]在南极冰盖下发现了一个直径约 20 km、深度为 1.5 km 的异常明亮的雷达反射区域，使用回波功率法建立了归一化次表层回波强度与次表层介质的介电常数之间的关系，对其进行定量分析得到该异常区域基底的相对介电常数估计值，并与含水物质的介电常数值相匹配，推测其为一个液态水湖，而水中含有 Mg、Ca、Na 等的高氯酸盐是其在低温环境下仍能保持液态的原因。这一探测现象重新点燃了关于火星极地地区目前是否存在稳定液态水的科学辩论。Lauro 等人[65]对前述发现液态水湖的乌尔蒂马断崖群区域使用了地球探测冰川地下水的方法，进一步确认了液态水湖的存在，并根据结果做出推断：SPLD 基底中可能存在零星分布的液态水。但是，理论上很难将液态水的存在与 SPLD 的

已知特征相协调[66]，这些地点可能需要异常高的地热通量才能保证地下液态水能够稳定存在，位于火星南极乌尔蒂马断崖群的异常雷达反射信号是否真的是液态水，还需要进一步的探测与讨论。Smith 等人[67]对此做出了另一种假设：认为是水合沉积物与富含粘土的沉积物造成了这一观测现象。Khuller 和 Plaut[57]研究发现，由于明亮反射区延伸至接近地表的地方，而年平均地表温度太低以至于过冷的高氯酸盐也无法保持液态，所以该区可能不是液态水。虽然无法确定 SPLD 底下液态水的存在与否及其稳定性，Khuller 和 Plaut[57]绘制的改进的基底地形地图仍可以用作水文地质模型来估计基底所受到的水势。不同于凭借介电常数的差异来解释基底处的高反射功率，Bierson 等人[68] 论证了可能是电导率的差异使其显示出这一特性，并考虑具有高电导率的材料，如粘土、含金属矿物或盐冰。

综上所述，MARSIS 在乌尔蒂马断崖群发现的异常明亮的基底反射起初被解释为液态水的存在。这一说法遭到质疑，并有研究推测为粘土、水合盐和含盐冰等物质。关于该如何解释该区域观测到的异常雷达现象的辩论仍在继续，譬如 Mattei 等人[69]结合模拟与新的实验室测量结果，证明后者材料的介电特性在 MARSIS 的频率与火星温度下不会产生强烈的基底反射，说明造成该现象的可能是高氯酸盐和氧化物卤水。Lalich 等人[70]利用已知火星极盖中存在的物质建立了不同的 SPLD 底部物质组成模型并计算分析了其回波功率，证明在没有液态水的情况下，由 SPLD 多层结构引起的信号干涉也能够产生类似的基底强反射信号。不论是何种结果，都表明了南极可能存在着一个复杂的水文系统。

4.3 火星赤道区域水冰探测

Watters 等人[71]利用 MARSIS 数据对火星赤道附近东经 $140^{\circ} \sim 240^{\circ}$ 之间的梅杜莎槽沟构造 (medusae fossae formation, MFF) 进行了研究，得到了该地区的沉积厚度与介电特性。MARSIS 探测到了梅杜莎槽沟地下结构的次表层分界面，通过分析其表层与次表层回波延迟，得到该处沉积物的介电常数实部为 2.9 ± 0.4，衰减系数根据次表层回波损耗计算得 (0.0048 ± 0.0024) dB/m，估计其损耗角正切为 $0.002 \sim 0.006$。上述介电参数暗示梅杜莎槽沟沉积物可能是低密度的低介电损耗的干燥物质，也可能是富冰材料，混合着高介电常数值和高损耗角正切的非冰组分。若为后者，则说明火星赤道带的灰尘和沙层下存在着大量的水冰，估计其体积含量与 NPLD 相当，并且其含尘量将比 NPLD 高 10% [68] 。不过，现有的数据并不能排除梅杜莎槽沟沉积物是干燥疏松物质可能性。Orosei 等人[72]利用 MARSIS 数据估算了梅杜莎槽沟部分区域内的整体介电性质，并与火山岩和冰尘混合物的介电性质进行了比较，研究结果支持了关于梅杜莎槽沟内卢库斯高原 (Lucus Planum) 东部和阿波利纳里斯山口 (Apollinaris Patera) 西北侧区域沉积物为高孔隙度火山碎屑物质的解释。Morgan 等人[73]根据 SHARAD 探测数据对火星上最年轻的火山区埃律西昂平原 (Elysium Planitia) 的次表层结构进行了三维可视化，显示该区域由多组重叠的不同来源的熔岩流组成，并推断是来自梅杜莎槽沟的物质形成了这些沉积层。无论哪种情况，与迄今为止雷达探测到的火星沉积物相比，这些沉积物都显示出独特的特性。

4.4 火星中纬度区域水冰探测

在火星演化历史中，其轨道与倾角的变化决定了火星上的水冰能稳定存在的地方。基于当前的火星气候及倾角，结合水冰的稳定性分布模型进行分析，结果表明火星的中纬度地区应该分布着稳定存在的水冰[74]。Bramson 等人[74]通过测量撞击坑的阶梯深度和绘制 SHARAD 雷达剖面图，研究了位于火星中纬度地区的阿卡迪亚平原的次表层。利用时间延迟法，结合深度和雷达延迟时间，估算了介电常数，推断出表层和次表层之间的 10 m 厚的材料主要是水冰，并且是体积约为 10^4 km^3 的过剩冰。

乌托邦平原位于火星北半球中纬度地区，是火星上最大的撞击盆地，直径达 3300 km，它的内部充满了多边形与扇形洼地。一方面，对火星乌托邦平原进行形态学分析，雷达观测到的地下反射面与乌托邦平原西南部的层状台地相关联。层状台地内退化特征随处可见，例如扇形洼地、暴露基底的内部间隙等。有研究将这些台地描述为年轻的、暗色调的地形，具有丰富的冰缘形态；认为它们以火山灰沉积为主，在经历大气沉降的短暂解冻现象后其孔隙空间富集了冰[75]，可以得出该地区含有大量的近地表水冰的结论。另一方面，从演化历史可知，火星经历的气候变化有利于北中纬度地区地下冰的累积[33]。因此，结合雷达观测结果，可以推测位于火星中纬度地区的乌托邦平原富含水冰。Stuurman 等人[33]利用 SHARAD 数据对这一假设进行了验证。文章在乌托邦平原西部的 SHARAD 数据中确定了一个面积约 375000 km^2 的广阔的雷达探测区域，该区域具有非常典型的适用时间延迟法的地形特征，估算出覆盖在反射物上的材料的介电常数约 2.8，为水冰、空气以及石质物质混合物。并进一步分析覆盖材料的组成成分为低于 30% 的岩屑物质，50% ~ 85% 的水冰和 15% ~ 50% 的孔隙空间，在这个地质单元中，水冰体积高达 14300 km^3。图 10 显示了乌托邦平原形态图的轮廓 (黑色实线)，以及位于乌托邦平原西南部的研究区域 (条纹斜线)。图 11 为 Stuurman 等人[33]对乌托邦平原西南部区域的次表层探测结果。其中 A.i 与 A.ii 分别表示 SHARAD 第 1346901 轨的数据与其对应地点的杂波仿真图，白色箭头表示探测到的次表层位置，黄色实线表示 MOLA 对轨迹星下点测得的地形数据，A.iii 为 MOLA 彩色高程图，黑点为探测到次表层界面的位置，白色实线为 A.i 的雷达轨迹；B.i–B.iii 为 SHARAD 第 1389101 轨的数据，展示方式与 A.i–A.iii 一致。可以看出，在乌托邦平原西南部地区，发现次表层界面的位置与地形海拔高度有关，也就是说，次表层界面多位于台地处。

舌状岩屑坡分布在火星南北半球的 30° ~ 60° 纬度，在舌状岩屑坡中发现的水冰表明，在火星中低纬度地区也能找到水。Plaut 等人[76]在火星北半球中纬度的德特罗尼勒斯门萨 (Deuteronilus Mensae) 地区，利用 SHARAD 的探测数据分析其舌状岩屑坡 (lobate debris aprons, LDA) 主要由水冰组成，当 SHARAD 穿过该处时，雷达回波图像中也出现了由一条反射回波分裂成上下两条反射回波的现象。利用 MOLA 高程数据进行建模与杂波仿真，可以确定分裂出的另一回波不是由非星下点的表面杂波引起的，确定该回波就是次表层回波。接收到来自舌状岩屑坡顶部和底部的强烈反射波，这意味着该物体大部分是由纯净的水冰构成 (位于两束反射波之间)，这也是希腊平原中的舌状岩屑坡为覆盖着一层薄岩层冰川的证据。通过计算时间延迟的方法估计舌状岩屑坡的介电常数为 3，衰减率约为 2 dB/μs，该介

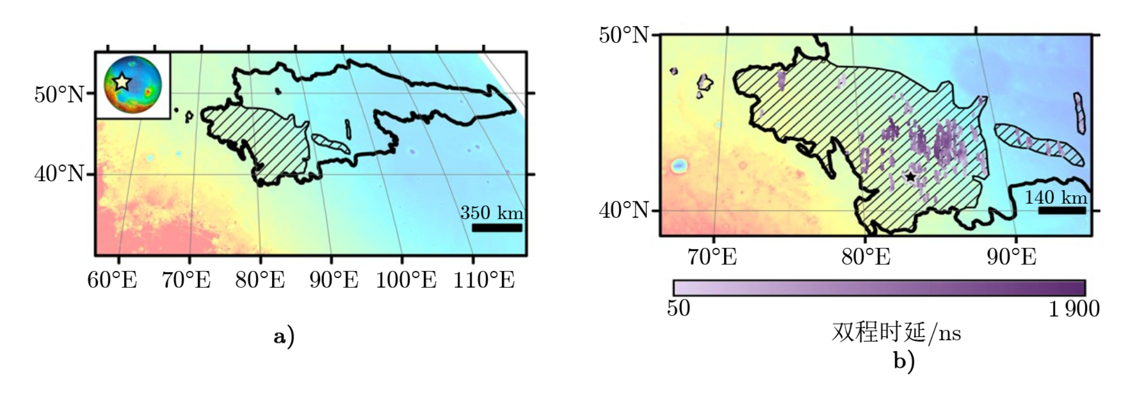


图 10 a) 乌托邦平原所在的位置及其西南部研究区域 (黑色斜线)；b) 浅表层反射物的位置，紫色表示双程时延[33]

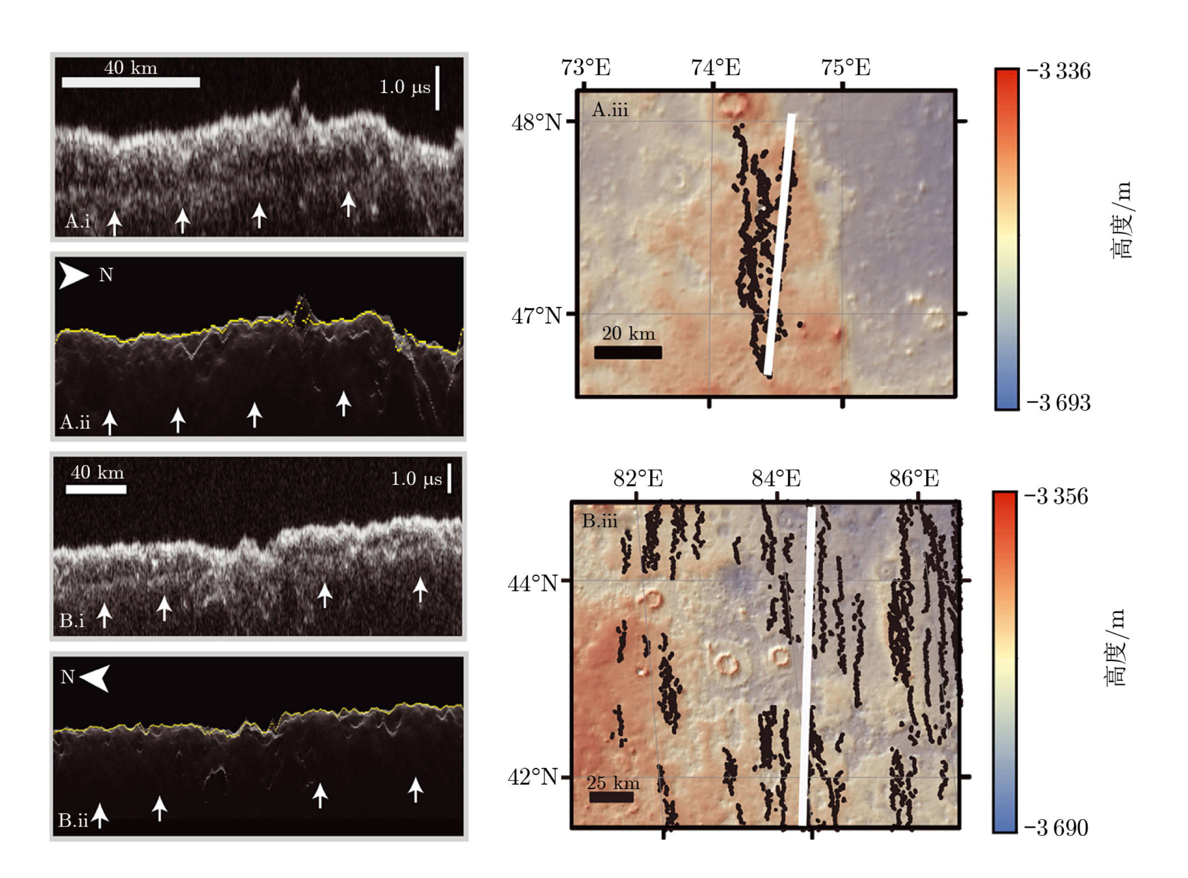


图 11 乌托邦平原西南部区域的次表层探测结果[33]

电特性与纯水冰或水冰混合物相符。除了在北半球中纬度地区探测到水冰之外，SHARAD 在火星南部的中纬度地区发现了被掩埋的冰川[16]。SHARAD 雷达探测图像显示，在海勒斯平原 (Hellas planitia) 东部地区的三个撞击坑中有舌状岩屑坡，实际上是埋藏在尘土和岩石层下的冰川。科学家们认为，雪和冰在地势较高的地方堆积起来，然后向下流动，现在被一层岩石碎片和灰尘保护着不被升华，表面的沟和脊是由变形的冰造成的。这些特征可能代表了迄今为止在火星上发现的最广泛的非极地冰。Holt 等人[16]的研究结果还表明，该区域的沉积物含有大量来自高倾角时期的水冰，现在隐藏在一层薄薄的“保护层”之下，且含尘量不可能高于 10%。这些冰川形成于中纬度地区，当时它们的生存环境与今天的气候条件明显不同，具有适宜的气候。根据从表面形态的估算，仅在海勒斯平原东部的舌状岩屑坡体积就可能高达约 28 000 km^3 的水冰。为进一步，Karlsson 等人[77]选取了火星中纬度地区的四个研究区域来估算舌状岩屑坡地形的总水冰体积。如图 12 所示，北半球与南半球各选取两个区域，分别为区域 1、2 和区域 3、4，其中区域 3 和 4 为海勒斯平原的东部地区。Karlsson 等人[77] 参考了冰流模型和冰流定律，并结合 MOLA 高程数据和 SHARAD 测量数据反演了舌状岩屑坡的冰厚度与屈服应力，求解出其面积与体积之间的关系，估计目前火星上的舌状岩屑坡总水冰体积为 1.55×10^5 km^3，不确定度 25%，相当于全球覆盖 1.1 m 的冰层。此外，反演结果发现，舌状岩屑坡面积与体积的关系与陆地冰盖和陆地冰原更接近，这可能表明舌状岩屑坡比陆地冰川更平坦，不像陆地上的山谷冰川，而更像小型冰盖。

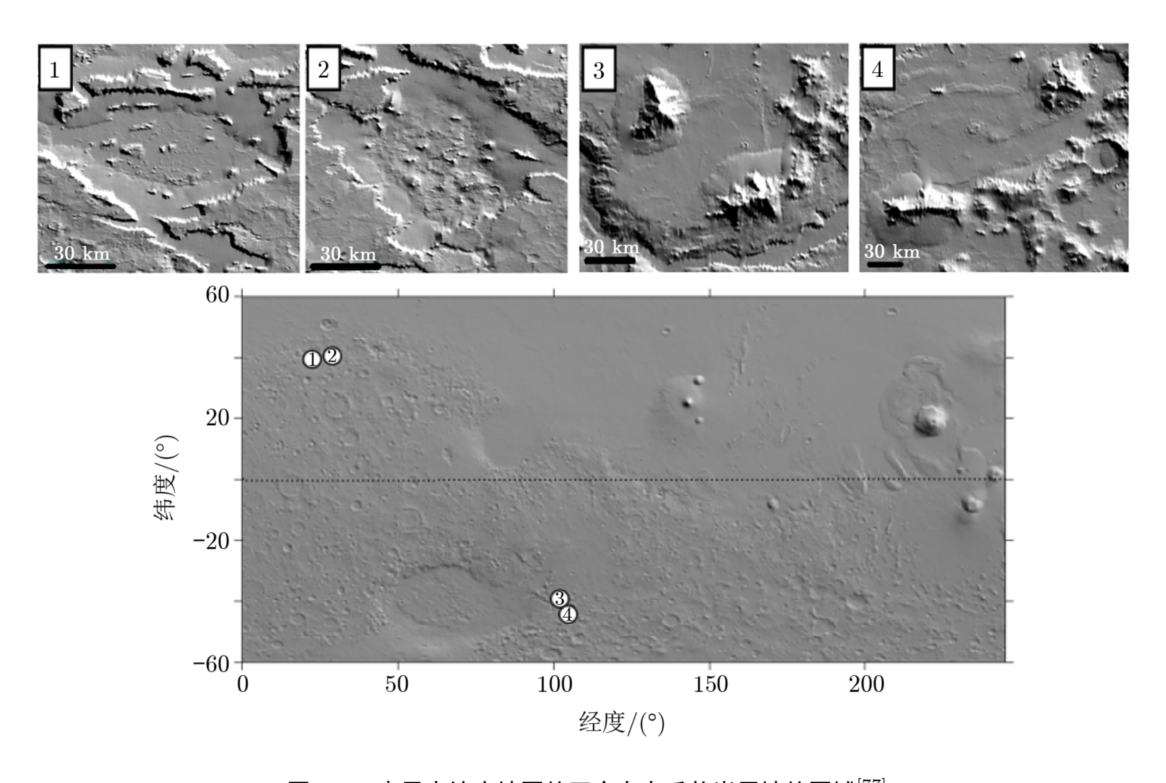


图 12　火星中纬度地区的四个存在舌状岩屑坡的区域[77]

表 3 列出了火星水冰探测的区域及其水冰成分与体积。可以看出，根据现有的研究成果表明，SPLD 的整体含尘量高于 NPLD。

表 3 水冰探测区域及结果

探测区域	水冰成分及性质	水冰体积
SPLD 整体冰盖[15]	水冰含尘量 $0\sim10\%$ 损耗角正切 $0.001\sim0.005$	最大厚度 $(3.7\pm0.4)\ \mathrm{km}^3$ 体积约 $1.6\times10^6\ \mathrm{km}^3$
NPLD 整体冰盖[14]	水冰含尘量不高于 2%	体积约 $(1.3\pm0.2)\times10^6\ \mathrm{km}^3$
乌托邦平原西部地区[33]	由低于 30% 的岩屑物质， $50\%\sim85\%$ 的水冰和 $15\%\sim50\%$ 的孔隙空间组成 介电常数 2.8 ± 0.8	体积约 $8\,400\sim14\,300\ \mathrm{km}^3$
海勒斯平原东部地区[16]	冰川含尘量不可能高于 10%	体积约 $28\,000\ \mathrm{km}^3$
梅杜莎槽沟沉积物[71]	水冰含尘量高于 $0\sim10\%$ 损耗角正切 $0.002\sim0.006$ 介电常数 2.9 ± 0.4	体积估计与 NPLD 相当

5 总结与展望

探索火星次表层对于寻找火星上的生命至关重要，因为地下水体被认为是火星上最有可能发现的水的形式之一，所以探测地下水仍然是火星探索的主要目标之一。雷达载荷利用电磁波的传播特性，是唯一可以揭示火星地下结构的科学仪器，已在火星地形地貌、地下物质与结构的探索方面发挥了显著的作用，能为研究火星气候与地质演化历史提供科学依据，在火星水冰探测方面具有重要的应用前景。欧美的两台星载雷达 SHARAD 和 MARSIS 已获取了大量火星表面、次表层及电离层的宏观数据，多年来，已经有许多通过雷达回波进行火星次表层物质介电参数的反演方法被提出。时间延迟法和回波功率法在分析火星地下介质的介电特性中发挥了重要的作用，两者分别有使用的优势和适用条件，并且都需要对研究区域的地质情况有一定的先验知识。例如火星两极区域常用水冰的介电常数来做假设，再用时间延迟法估算其厚度，在其他区域常结合当地的地质条件和地质历史来判断假设是否正确；回波功率法则是需要用真实值与模拟值做对比，再结合地质背景推导出合适的介电常数取值。因此，在发展如何更好地解译雷达回波数据的同时，还需要通过其他的探测手段对火星地质提供更多角度的约束 (分层厚度、组成成分、含尘量等)，从而使得地质解译更贴近真实，提供更精确的科学信息。

在欧美取得丰富的探测成果的基础上，我国首次开展火星探测是极具创新性与挑战性的深空探测任务。基于现有的研究方法与结果，以下给出一些对我国 MOSIR 数据处理的展望。

(1) 对雷达回波进行正演模拟已广泛应用于月球车雷达中[27, 78]，我们可以将该方法用于

高精度火星表面建模及回波仿真。由于 MOSIR 具有双极化探测特性，因此进行回波仿真时需要考虑不同极化方式下的表面散射模式，以更好贴合 MOSIR 的实际探测数据。

(2) 使用仿真回波计算回波的圆极化率、偏振度等极化特性参数，总结出在某些特定分层结构下的极化特性的特征和规律，验证极化特性提取方法，为处理实际探测数据时的介电参数反演和极化特性提取提供可靠的判别依据。

(3) 融合火星雷达的多源数据，开展 MARSIS、SHARAD、MOSIR 及我国火星巡视器上搭载的次表层穿透雷达 RoSPR 数据的综合分析。补充和验证不同深度和分辨率的探测数据，获得更可靠的火星全球“水资源”分布特征。

随着航天技术的发展和深空探测精度的不断提高，我国也开始进行火星探测的研究。利用雷达进行火星水冰及液态水的探测一直是热点科学问题，我们需要充分利用国际上已有的海量数据，总结前人的研究经验，并最大程度地发挥天问一号极化雷达的技术优势。

参考文献：

[1] 于登云, 孙泽洲, 孟林, 等. 深空探测学报, 2016, 3(2): 108
[2] Grotzinger J P, Arvidson R, Bell Iii J, et al. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 240(1): 11
[3] Andrews-Hanna J C, Zuber M T, Arvidson R E, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2010, 115(E6): E06002
[4] Leovy C. Nature, 2001, 412: 245
[5] Jakosky B M, Phillips R J. Nature, 2001, 412: 237
[6] Pettinelli E, Cosciotti B, Lauro S E, et al. The Leading Edge, 2022, 41(10): 672
[7] Porcello L J, Jordan R L, Zelenka J S, et al. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 769
[8] Simpson R A, Tyler G L, Lipa B J. Icarus, 1977, 32(2): 147
[9] Kofman W, Herique A, Barbin Y, et al. Science, 2015, 349: 639
[10] https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Deployment_of_second_MARSIS_boom_delayed, 2023
[11] https://mars.nasa.gov/mro/mission/instruments/sharad/, 2023
[12] Fan M, Lyu P, Su Y, et al. Space Science Reviews, 2021, 217: 1
[13] Orosei R, Jordan R, Morgan D, et al. Planetary and Space Science, 2015, 112: 98
[14] Picardi G, Plaut J J, Biccari D, et al. Science, 2005, 310: 1925
[15] Plaut J J, Picardi G, Safaeinili A, et al. Science, 2007, 316: 92
[16] Holt J W, Safaeinili A, Plaut J J, et al. Science, 2008, 322: 1235
[17] Fois F, Mecozzi R, Iorio M, et al. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2007: 2134
[18] Phillips R J, Zuber M T, Smrekar S E, et al. Science, 2008, 320: 1182
[19] Hong T, Su Y, Fan M, et al. Remote Sensing, 2021, 13(24): 5049
[20] 范明意, 吕鹏. 深空探测学报, 2018, 5(5): 478
[21] Hanson J C, Barwick S W, Berg E C, et al. Journal of Glaciology, 2015, 61: 438
[22] Campbell K, Orange A. Polar record, 1974, 17: 31
[23] Langley K, Hamran S E, Hogda K A, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(9): 2506
[24] Liu C, Ye H, Jin Y Q. Radio Science, 2014, 49(7): 473
[25] Seu R, Biccari D, Orosei R, et al. Planetary and Space Science, 2004, 52: 157
[26] Jordan R, Picardi G, Plaut J, et al. Planetary and Space Science, 2009, 57: 1975

[27] Fa W, Wieczorek M A, Heggy E. Journal of Geophysical Research: Planets, 2011, 116: E03005
[28] Choudhary P, Holt J W, Kempf S D. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(9): 1285
[29] Fa W, Jin Y. Science China. Earth Sciences, 2010, 53(7): 1043
[30] Alberti G, Castaldo L, Orosei R, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2012, 117(E9): E09008
[31] Picardi G, Biccari D, Cartacci M, et al. 2007 4th International Workshop on, Advanced Ground Penetrating Radar, Aula Magna Partenope, Italy, 2007: 256
[32] Zhang Z, Hagfors T, Nielsen E, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2008, 113(E5): E05004
[33] Stuurman C, Osinski G, Holt J, et al. Geophysical Research Letters, 2016, 43(18):9484
[34] Selvans M, Plaut J, Aharonson O, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2010, 115(E9): E09003
[35] Mouginot J, Pommerol A, Kofman W, et al. Icarus, 2010, 210(2): 612
[36] Grima C, Kofman W, Herique A, et al. Icarus, 2012, 220(1): 84
[37] Nouvel J F, Herique A, Kofman W, et al. Radio Science, 2004, 39(1): 1
[38] Orosei R, Ding C, Fa W, et al. Life, 2020, 10(8): 120
[39] Nouvel J F, Martelat J E, Herique A, et al. Planetary and Space Science, 2006, 54(4): 337
[40] Rust A, Russell J, Knight R. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1999, 91(1): 79
[41] Ulaby F, Moore R, Fung A. Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 2-Radar remote sensing and surface scattering and emission theory, 1982
[42] Matzler C. Solor System Ices, edit by Schmitt B, De Bergh C, Festou M. Dordrecht: Astrophysics and Space Science Library, 1998: 241
[43] Pettinelli E, Vannaroni G, Cereti A, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2003, 108(E4): 8029
[44] Meng X, Xu Y, Xiao L, et al. The Astronomical Journal, 2020, 159(4): 156
[45] Liu C, Jin Y Q, et al. International Journal of Astronomy and Astrophysics, 2019, 9(03): 335
[46] Lalich D, Holt J. Geophysical Research Letters, 2017, 44(2): 657
[47] Lalich D, Holt J, Smith I. Journal of Geophysical Research: Planets, 2019, 124(7): 1690
[48] Bibring J P, Langevin Y, Poulet F, et al. Nature, 2004, 428(6983): 627
[49] Byrne S. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2009, 37: 535
[50] Laskar J, Correia A C, Gastineau M, et al. Icarus, 2004, 170(2): 343
[51] Forget F, Haberle R, Montmessin F, et al. Science, 2006, 311(5759): 368
[52] Schorghofer N. Nature, 2007, 449(7159): 192
[53] Smith D E, Zuber M T, Frey H V, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2001, 106(E10): 23689
[54] Kieffer H H. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1990, 95(B2): 1481
[55] Broquet A, Wieczorek M A, Fa W. Geophysical Research Letters, 2020, 47(5): 6746
[56] Broquet A, Wieczorek M, Fa W. Journal of Geophysical Research: Planets, 2021, 126(8): 6730
[57] Khuller A R, Plaut J J. Geophysical Research Letters, 2021, 48(13): 93631
[58] Seu R, Phillips R J, Biccari D, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2007, 112(E5): E05S05
[59] Milkovich S, Plaut J, Safaeinili A, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2009, 114(E3): E03002
[60] Farrell W, Clifford S, Milkovich S, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2008, 113(E4): E04002
[61] McEwen A S, Hansen C, Delamere W A, et al. Science, 2007, 317: 1706
[62] Mustard J F, Murchie S L, Pelkey S, et al. Nature, 2008, 454: 305
[63] Malin M C, Edgett K S. Science, 2000, 288: 2330
[64] Orosei R, Lauro S E, Pettinelli E, et al. Science, 2018, 361: 490
[65] Lauro S E, Pettinelli E, Caprarelli G, et al. Nature Astronomy, 2021, 5(1): 63
[66] Sori M M, Bramson A M. Geophysical Research Letters, 2019, 46(3): 1222
[67] Smith I, Lalich D, Rezza C, et al. Geophysical Research Letters, 2021, 48(15): 93618
[68] Bierson C, Tulaczyk S, Courville S, et al. Geophysical Research Letters, 2021, 48(13): 93880
[69] Mattei E, Pettinelli E, Lauro S E, et al. Earth and Planetary Science Letters, 2022, 579: 7370
[70] Lalich D, Hayes A, Poggiali V. Nature Astronomy, 2022, 6(10): 1142
[71] Watters T R, Campbell B, Carter L, et al. Science, 2007, 318: 1125
[72] Orosei R, Rossi A P, Cantini F, et al. Journal of Geophysical Research: Planets, 2017, 122(7): 1405

[73] Morgan G A, Campbell B A, Carter L M, et al. Geophysical Research Letters, 2015, 42(18): 7336
[74] Bramson A M, Byrne S, Putzig N E, et al. Geophysical Research Letters, 2015, 42(16): 6566
[75] Soare R, Horgan B, Conway S, et al. Earth and planetary science letters, 2015, 423: 182
[76] Plaut J J, Safaeinili A, Holt J W, et al. Geophysical research letters, 2009, 36(2): L02203
[77] Karlsson N, Schmidt L, Hvidberg C. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2627
[78] Jin Y Q, Xu F, Fa W. Radio Science, 2007, 42(03): 1

Inversion of Martian Subsurface Dielectric Parameters Based on Mars Orbiter Radar and its Application in Water Ice Detection

DU Wei[1,2,3], SU Yan[1,2,3], DAI Shun[1,2], ZHANG Zong-yu[1,2,3], HONG Tian-sheng[1,2,3], LIU Shu-ning[1,2,3]

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Mars is the most similar planet in the solar system to the Earth, and it is an important step in China's deep space exploration. The exploration and study of the surface topography of Mars show that liquid water once existed on the surface of Mars, so the search for water ice on Mars is one of the important scientific goals of Mars exploration. In Mars exploration, penetrating radar uses the penetration characteristics of electromagnetic wave to obtain the delay difference and intensity of the layered interface to invert the dielectric constant and loss tangent of the subsurface material. The dielectric properties of the subsurface layer can help us to infer important information such as the physical properties of the medium and the existence of water ice, so as to understand the climate and geological evolution history of Mars. This paper introduces the detection principle of Mars orbiter radar, summarizes the methods of inversion of the dielectric parameters of Martian medium by using the echo data of the subsurface penetrating radar, and summarizes the scientific applications and achievements of these methods in the detection of Martian water ice, and gives a prospect of Mars orbiter radar in China.

Key words: Mars; permittivity; orbiter radar; subsurface; water-ice